

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
PhD 13223  
Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя  
д.т.н., професору  
Литвиненку Ярославу Володимировичу

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора філософії Павла РАДЮКА  
на дисертаційну роботу Мосія Любомира Євгенійовича,  
«Моделі та методи інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак  
електрокардіосигналів»,  
подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії  
з галузі знань 12 Інформаційні технології  
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

На сьогодні розвиток інформаційних технологій медичної діагностики, зокрема автоматизованої кардіодіагностики, є важливим напрямом сучасної комп'ютерної науки. Серцево-судинні захворювання залишаються однією з основних причин втрати працездатності та смертності, а електрокардіографія є доступним і поширеним методом неінвазивного оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи. Тому підвищення точності, відтворюваності та об'єктивності опрацювання електрокардіосигналів має істотне наукове і прикладне значення.

Актуальність дисертаційної роботи Мосія Любомира Євгенійовича зумовлена потребою в таких математичних моделях і методах аналізу електрокардіосигналів, які враховують не лише середню форму кардіоциклу, а й міжциклову мінливість амплітудних та часових характеристик його характерних зубців. У багатьох наявних підходах ритмічна складова здебільшого зводиться до аналізу інтервалів між R-зубцями, тоді як морфологічна мінливість різних зубців та зон кардіоциклу залишається недостатньо формалізованою. Це обмежує можливості автоматизованого виявлення ранніх або локальних ознак порушень електричної активності серця.

Обрана здобувачем тематика пов'язана з розробленням моделей електрокардіосигналів у вигляді циклічних випадкових процесів із сегментною зонною структурою, функцій амплітудної та часової варіабельності, а також алгоритмів класифікації кардіологічних станів. Такий підхід є актуальним,

оскільки дає змогу узгоджено досліджувати морфологічні й ритмічні ознаки в межах єдиного математичного апарату та використовувати їх у системах підтримки прийняття діагностичних рішень. Отже, тема дисертаційної роботи є своєчасною, відповідає потребам розвитку інформаційних технологій у медичній діагностиці та має належне теоретичне і практичне підґрунтя.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Дослідження пов'язане з напрямом наукової роботи міжнародної наукової школи «Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці», яка функціонує на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Також дисертаційна робота пов'язана з дослідженням у межах науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів», № держреєстрації 0125U000105, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського Міністерства охорони здоров'я України, у частині обґрунтування та розроблення нових діагностичних ознак для застосування в інтелектуальних системах кардіодіагностики.

## **3. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

Отримані наукові результати дисертаційної роботи мають ознаки новизни та спрямовані на формалізацію аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів. Основні положення наукової новизни сформульовані у дисертації так:

1. Вперше запропоновано математичні моделі варіабельності ЕКС у вигляді функції амплітудної варіабельності (ФАВ) – випадкової послідовності різниць амплітуд зубців ЕКС (Р, Q, R, S, Т) у послідовних кардіоциклах, та функції часової варіабельності (ФЧВ) – послідовності часових інтервалів між піками однойменних зубців ЕКС у послідовних кардіоциклах, що на відміну від існуючих моделей враховують амплітудну та ритмічну структуру кардіоциклу та їх міжциклову стохастичну динаміку. Це дає змогу ідентифікувати комплекси морфологічних та ритмічних діагностичних ознак на основі статистичних характеристик ФАВ і ФЧВ.

2. Вперше запропоновано метод ідентифікації інформативних морфологічних ознак ЕКС на основі його моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою, що на відміну від

існуючих методів враховує розкиди амплітуди на циклах (дисперсію) сигналу. Це дає змогу ідентифікувати діагностичні ознаки ЕКС, які відображають варіабельність його морфологічної структури на циклах та запропонувати алгоритм їх аналізу і комп'ютерного моделювання.

3. Отримав подальший розвиток метод ідентифікації інформативних ритмічних ознак ЕКС на основі його моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою, що на відміну від існуючих методів враховує розкиди тривалостей циклів і діагностичних зон на циклах циклічного сигналу. Це дає змогу ідентифікувати діагностичні ознаки ЕКС, які відображають варіабельність його ритму на циклах та запропонувати алгоритм їх аналізу і комп'ютерного моделювання.

4. Отримав подальший розвиток метод класифікації серцево-судинних захворювань на основі виділених із функції амплітудної варіабельності морфологічних ознак із використанням алгоритмів машинного навчання та SHAP-аналізу, що дозволило обґрунтувати важливість діагностичних ознак та розширити діагностичні можливості кардіодіагностики.

Зазначені положення є взаємопов'язаними: математична модель у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою формує теоретичну основу дослідження, функції амплітудної та часової варіабельності виступають джерелом інформативних ознак, а алгоритми класифікації забезпечують їх прикладне використання в задачах автоматизованої кардіодіагностики.

#### **4. Короткий аналіз основного змісту дисертації**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено методи дослідження, наукову новизну, практичне значення, особистий внесок здобувача, апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг дисертації.

*Об'єкт дослідження* – процес діагностики серцево-судинних захворювань на основі аналізу електрокардіосигналів.

*Предмет дослідження* – модель електрокардіосигналу, методи його опрацювання та прийняття рішень на основі аналізу морфологічних та ритмічних ознак ЕКС.

*Мету дисертаційної роботи* формалізовано як підвищення ефективності діагностики серцево-судинних захворювань шляхом розроблення математичних моделей та методів інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів на основі циклічних випадкових процесів, функцій

амплітудної та часової варіабельності електрокардіосигналів, а також створення відповідної інформаційної технології комп'ютерної кардіодіагностики.

У першому розділі дисертації проаналізовано моделі, методи та інформаційні технології аналізу електрокардіосигналів. Розглянуто клінічне значення ЕКС, підходи до їхнього опрацювання, ідентифікацію морфологічних і ритмічних ознак та алгоритми автоматизованої діагностики. Обґрунтовано обмеження наявних моделей, зокрема недостатнє врахування циклічності сигналу, сегментної зонної структури кардіоциклу та міжциклової мінливості ознак.

У другому розділі розроблено математичні моделі ЕКС на основі циклічних випадкових процесів. Основну увагу приділено сегментній циклічній і зонній структурі сигналу, функції ритму, методам сегментації, функціям амплітудної та часової варіабельності. Запропонований апарат формалізує зміни ЕКС у послідовних кардіоциклах і забезпечує локальний аналіз характерних зон сигналу.

У третьому розділі подано інформаційну технологію інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак ЕКС на основі моделі циклічного випадкового процесу, функцій амплітудної та часової варіабельності. Проведено експериментальну перевірку на реальних ЕКС, частотний аналіз статистичних характеристик та статистичну валідацію запропонованих функцій.

У четвертому розділі наведено результати застосування методів машинного навчання для класифікації ЕКС за морфологічними й ритмічними ознаками. Досліджено алгоритми виявлення аномалій, вплив попередньої обробки даних, класифікацію серцево-судинних захворювань за статистичними ознаками ФАВ та інтерпретацію результатів за допомогою SHAP-аналізу.

У загальних висновках підсумовано основні наукові й практичні результати дисертації. Структура роботи є послідовною: кожний розділ розв'язує окрему складову поставленого наукового завдання, а виклад матеріалу відповідає меті дослідження.

## **5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність**

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації є достатньо обґрунтованими. Теоретичну основу роботи становлять методи теорії циклічних випадкових процесів, математичної статистики, лінійної алгебри, комп'ютерного моделювання та машинного навчання.

Достовірність результатів підтверджується використанням реальних електрокардіосигналів, зокрема 204 записів із бази PhysioNet, статистичною перевіркою властивостей функцій амплітудної та часової варіабельності, зокрема стаціонарності й відповідності розподілів обраним статистичним критеріям, а також порівнянням алгоритмів класифікації за кількісними метриками.

Висновки відповідають поставленим завданням. Запропоновані моделі функцій амплітудної та часової варіабельності, модель електрокардіосигналу у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою та результати класифікації серцево-судинних захворювань утворюють цілісний науковий результат.

## **6. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Практичне значення роботи полягає в створенні програмного комплексу підтримки діагностичних рішень. Комплекс передбачає два рівні аналізу: основний – на основі моделі циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою; експрес-рівень – на основі статистичних характеристик функцій амплітудної та часової варіабельності.

Програмний комплекс «Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів» призначений для кількісного аналізу електрокардіосигналів і може використовуватись як допоміжний засіб підтримки клінічного рішення.

Результати дослідження використано під час виконання науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів», № державної реєстрації 0125U000105. Також результати впроваджено і використовуються в ТОВ «НВП «ІНФОТЕХМЕД»», м. Тернопіль, у навчальному процесі кафедри медичної інформатики Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського та кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Запропоновані підходи можуть бути використані також для аналізу інших біомедичних сигналів циклічної природи, пов'язаних із роботою серцево-судинної системи.

## **7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Структура дисертаційної роботи відповідає логіці наукового дослідження. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 152 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінку, з яких 131 сторінка основного тексту; робота містить 9 додатків на 50 сторінках, 30 рисунків, 77 формул і 20 таблиць.

Результати дисертаційної роботи висвітлено у 20 наукових працях: основні наукові результати опубліковано у 12 статтях у наукових фахових виданнях України; результати дисертації апробовано на наукових конференціях; за матеріалами апробації опубліковано 8 праць у матеріалах

міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, зокрема 4 статтях у матеріалах конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus. Ключові наукові положення дисертаційної роботи достатньо подано в опублікованих працях здобувача.

За результатами аналізу тексту дисертації ознак порушення академічної доброчесності в межах опрацювання роботи не виявлено. Використані ідеї, результати й тексти інших авторів супроводжуються посиланнями. Особистий внесок здобувача в спільних публікаціях зазначено в списку публікацій.

## **8. Мова та стиль дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота написана науковим стилем, логічно, послідовно та загалом зрозуміло. Виклад матеріалу відповідає предметній області комп'ютерних наук та інформаційних технологій медичного спрямування. Термінологічний апарат здебільшого використано правильно, основні скорочення подано у відповідному переліку, що полегшує сприйняття тексту.

Структура речень, послідовність подання математичних моделей, опис експериментальних досліджень і формулювання висновків загалом забезпечують належний рівень наукової комунікації. Тема, зміст та отримані результати дисертаційної роботи відповідають спеціальності 122 Комп'ютерні науки, галузі знань 12 Інформаційні технології.

## **9. Зауваження до дисертації**

1. У підрозділі 1.4 дисертації сформульовано шість вимог до математичних моделей та методів аналізу ЕКС (стор. 56–57). У табл. 1.1 наведено порівняння детермінованих, стохастичних моделей, ЦВП, ФАВ, ФЧВ та ЦВП із сегментною зонною структурою (стор. 58). Водночас доцільно було б подати формалізовану шкалу вагомості цих критеріїв, оскільки в таблиці використано лише бінарні позначення наявності або відсутності властивостей.

2. У підрозділі 2.5.1 функцію амплітудної варіабельності визначено як різницю амплітуд однойменних зубців P, Q, R, S, T у поточному та попередньому кардіоциклах за формулою (2.50) на стор. 84. Окремо наведено механізм обробки артефактних значень через останній валідний цикл за формулою (2.51) на стор. 85. Проте в роботі недостатньо кількісно оцінено, як похибки виявлення піків P, Q, R, S, T або зміщення меж кардіоциклів впливають на значення ФАВ і ФЧВ.

3. У розділі 3 експериментальна верифікація проведена на реальних записах електрокардіосигналів, зокрема з використанням бази PhysioNet, як вказано на стор. 111–112. Проте опис формування вибірки, балансу між класами, характеристик пацієнтів, відведень та умов попереднього

опрацювання міг би бути докладнішим. Це дало б змогу точніше оцінити межі узагальнення отриманих результатів на інші групи пацієнтів і типи електрокардіографічних записів.

4. Статистичну валідацію ФАВ подано достатньо докладно: результати перевірки стаціонарності наведено в табл. 3.5 (стор. 115), нормовані автокореляційні функції – на рис. 3.14 (стор. 116), а результати тесту Андерсона-Дарлінга – у табл. 3.6 (стор. 118). Однак у межах розділу 3 не завжди достатньо пояснено, як суперечливі результати різних статистичних критеріїв впливають на подальший вибір ознак. Доцільно було б ширше прокоментувати практичні наслідки випадків, коли одна характеристика визнається прийнятною за одним критерієм і непринятною за іншим.

5. У четвертому розділі отримано високі значення точності класифікації після попередньої обробки даних. Зокрема результати класифікації морфологічних ознак наведено в табл. 4.1–4.4 на стор. 130–132, а ритмічних ознак – у табл. 4.5–4.8 на стор. 132–134. Разом із тим бажано було б докладніше описати процедуру розподілу даних на навчальну та тестову частини, запобігання потраплянню фрагментів одного пацієнта до різних вибірок, а також подати довірчі інтервали або результати багаторазової перехресної перевірки. Це посилює переконливість висновків щодо стійкості класифікаційних моделей.

6. Інтерпретація діагностичної значущості окремих статистичних ознак, що описана в підрозділі 4.2.4, зокрема асиметрії та ексцесу функції амплітудної варіабельності, є цікавою і перспективною. Однак клінічне тлумачення цих ознак у зв'язку з усталеними електрокардіографічними критеріями подано стисло. Варто було б доповнити роботу ширшим обговоренням того, як отримані математичні ознаки можуть бути пояснені лікарю-кардіологу та зіставлені з традиційними діагностичними показниками.

7. Розроблений у межах дисертації програмний комплекс, «Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів», описано з погляду функціональних можливостей у додатку II. Водночас у тексті бракує розгорнутого аналізу обчислювальної складності, часу опрацювання типового запису, вимог до апаратного середовища та сценаріїв роботи з великими масивами електрокардіографічних даних. Такий аналіз був би корисним для оцінювання готовності програмного комплексу до ширшого практичного застосування.

Проте зазначені зауваження мають дискусійний характер, не знижують наукової та практичної цінності дисертації і не впливають на позитивну оцінку роботи загалом.

## 10. Висновок щодо дисертації

Дисертаційна робота Мосія Любомира Євгенійовича «Моделі та методи інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що включає нові теоретично обґрунтовані та практично значущі результати. У дисертації розв'язано актуальне наукове завдання підвищення ефективності автоматизованої кардіодіагностики шляхом розроблення моделей та методів інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів.

Отримані наукові та практичні результати мають суттєве значення для розвитку галузі інформаційних технологій загалом та комп'ютерних наук зокрема. Тематика та зміст дисертаційного дослідження повністю відповідають профілю спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Отже, на основі викладеного вище вважаю, що дисертація Мосія Любомира Євгенійовича на тему «Моделі та методи інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів», що подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Мосій Любомир Євгенійович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

### Офіційний опонент:

доктор філософії,  
доцент кафедри комп'ютерних наук  
Хмельницького національного університету

Павло РАДЮК

«Підпис Павла РАДЮКА засвідчую»  
Проректор з наукової роботи  
Хмельницького національного університету



Олег СИНЮК